



# 四肢先端の視覚運動同期による 伸張四肢透明身体への所有感生成

近藤 亮太<sup>1)</sup>, 杉本 麻樹<sup>2)</sup>, 南澤 孝太<sup>3)</sup>, 稲見 昌彦<sup>4)</sup>, 北崎 充晃<sup>1)</sup>

1) 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市 天伯町雲雀ヶ丘 1-1, kondo@real.cs.tut.ac.jp, mich@cs.tut.ac.jp)

2) 慶應義塾大学理工学部 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, sugimoto@ics.keio.ac.jp)

3) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒223-8526 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1, kouta@kmd.keio.ac.jp)

4) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4 丁目 6 番 1 号, inami@inami.info)

**概要** : 身体所有感の錯覚によって, 自身とは異なる形状の身体を自分の身体のように感じることが可能である。これまでに, 四肢先端の同期運動のみから透明な身体に対して所有感が生じることを示した。本研究では, 四肢先端のみの刺激から手先の位置を変えることで, 通常とは異なる四肢身体が知覚されるか調べた。その結果, 手先の位置を変えた刺激が被験者の運動に同期することで腕の長い身体が知覚され, その身体に所有感が生じた。

**キーワード** : 身体所有感, 人間拡張, クロスモーダル

## 1. 序論

ヒトは自身とは異なる形状の身体をあたかも自分の身体のように感じることができる。これは身体所有感の錯覚[1]と呼ばれ, 視覚刺激と同期した触覚刺激の提示[2]や, 被験者の運動と同期した身体映像の提示[3]によって生じる。このように, 身体所有感の錯覚には受動的なものと能動的なもの2つに分類される。

これまでの研究から, 様々な身体形状に対して身体所有感が発生することが知られており, 伸張された手[4][5], お腹の大きい身体[6], 子供の身体[7], 非常に大きいまたは小さい身体[8]であっても身体所有感が生じる。

Armel and Ramachandran [4]は, 腕の長いラバーバンドに対しても, 腕の長いラバーバンドの手と被験者の手を同時に刺激することで身体所有感が生じることを, 主観評定と皮膚コンダクタンス反応を用いて示した。

Kilteni et al [5]は, ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通して被験者の腕に連動して動き, 徐々に伸びるバーチャルな腕を提示している。実験結果から, 被験者の腕の3倍までは身体所有感が生じることが明らかとなっている。このように, 腕が最初から長い場合[4]と徐々に長くなる場合[5]の両方で身体所有感が生じる。

透明な身体に対しても受動的な方法と能動的な方法の両方で身体所有感が生じることが明らかとなっている[9][10]。受動的な方法では, 被験者の身体と何もない空間を同時にブラシで撫でることで, 透明な身体に所有感が生

じる[9]。能動的な方法では, 手先と足先のみの身体が被験者の運動に同期して動くことで, 身体所有感が生じ, 手先足先のみから全身が見えると報告されている[10]。

本研究では, 四肢先端の同期運動のみから全身が見えることに着目し, 被験者の運動に同期する四肢透明身体の手先の位置を変化させることで腕の長い四肢身体が知覚されるか調べることを目的とした。

## 2. 実験 1

透明身体で実施する前段階として, 腕の長い全身アバタに対して身体所有感が生じるか調べた。

### 2.1 方法

#### 2.1.1 被験者

実験の目的を知らない 8 名の被験者 (すべて男性, 平均年齢 22.125 歳 ± 2.23SD, 平均身長 168.43cm ± 4.83SD) がインフォームドコンセントに署名した後, 実験に参加した。被験者は正常な身体能力と視力を有した。本実験は, 「豊橋技術科学大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会」の承認を得て実施された。

#### 2.1.2 装置

HMD (Oculus Rift DK2, 解像度 1920x1080 pixel, 視野角 90deg (水平) x 110deg (垂直), リフレッシュレート 75Hz) を用いてコンピュータ (OS: Windows 10, RAM: 16.0GB, CPU: Intel(R)Core(TM)i5-6400 CPU @2.70GHz (4CPU) , GPU: GeForce GTX 1080) で作成した刺激を被験者に提示した。被験者の動きはモーションキャプチャ装置 (Microsoft Kinect v2, リフレッシュレート 30Hz) でリアルタイムに記録し, 同一のコンピュータに取り込んだ。

#### 2.1.3 刺激と条件

Unity で作成した空間に, 1 人称視点で白い全身アバタ

Ryota KONDO, Maki SUGIMOTO, Kouta MINAMIZAWA, Masahiko INAMI, and Michiteru KITAZAKI

(図1)を提示した。アバタの腕の長さは通常(78cm)、左腕のみ長い場合(128cm)、右腕のみ長い場合(128cm)の3種類であった。腕が長い条件では、肩から肘までと肘から手首までがそれぞれを25cmずつ引き伸ばしており、肘は被験者と同じ角度で曲がった。アバタの身長は195cmであり、縦横比を保ったまま被験者の身長に合わせた。アバタは被験者の運動に同期(または非同期)で動いた。アバタの前方にはアバタ全体が映る鏡を配置した。

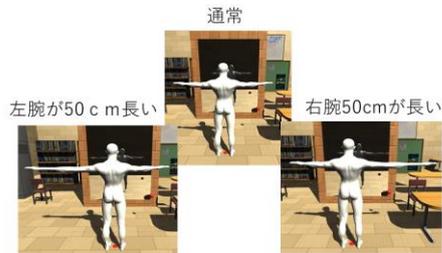


図1: 白い全身アバタ

#### 2.1.4 手続き

被験者は Kinect から 2.75m 離れた位置に立ち、Kinect の方向を向き HMD を装着して刺激を両眼で観察した。10秒の暗転後、部屋にアバタと赤いボールが提示された。ボールは被験者の初期位置を基準に、左右 60cm (右: 30cm, 左: 30cm)、床から高さ 1.3m~1.6m、前方 50cm~60cm の範囲のランダムな位置に出現した。被験者は初期位置から動かず、目の前に提示された赤いボールを左右どちらかの手で触って消すタスクを 5 分間行った。被験者は一度ボールを触ったら手をおろしてから再びボールを触るよう教示された。ボールはアバタの手が触れると消え、2秒後再びランダムな位置に出現した。その後、身体認知に関する質問 8 項目に対して -3 (全く感じない) ~ 3 (非常に強く感じた) の 7 段階リッカートスケールで答えた(主観評定)。各被験者に対して、身体条件 3 水準(通常、左腕が長い、右腕が長い)と同期条件 2 水準(同期、非同期)の組み合わせを各 2 回ずつランダムな順で計 12 試行実施した。

1. 下を見たときに見える白い身体が自分の身体であるように感じた。
2. 鏡に映った白い身体が自分の身体であるかのように感じた。
3. 自分の右腕が長くなったように感じた。
4. 自分の左腕が長くなったように感じた。
5. 白い身体の動きが自分の動きのように感じた。
6. 白い身体の動きが他人の動きのように感じた。
7. 普段と比べて姿勢が傾くような感じがした。
8. 自分の身体が床になったように感じた。

#### 2.2 結果

被験者 8 名のうち 1 名は実験中に足の痛みにより中断し、分析から除外した。

##### 2.2.1 主観評定

各質問項目に対して、被験者内 2 要因(身体条件 3 水準、同期条件 2 水準)の分散分析を行った。アバタが被験者の運動に同期して動くことで、腕の長さに関係なく身体所有

感が生じた(図2; 同期条件の主効果: Q1  $F(1,6)=16.11$ ,  $p=.007$ ,  $\eta_p^2=0.73$ ; Q2  $F(1,6)=17.77$ ,  $p=.006$ ,  $\eta_p^2=0.75$ ;)。被験者はアバタの腕が長く同期しているとき、対応する腕が長くなったように感じた(交互作用: Q3  $F(2,12)=6.46$ ,  $p=.012$ ,  $\eta_p^2=0.52$ ; Q4  $F(2,12)=22.79$ ,  $p=.0001$ ,  $\eta_p^2=0.79$ ;)。被験者の動きにアバタが同期している時、被験者はそれを自分の動きのように感じ、非同期の時は他人の動きのように感じた(同期条件の主効果: Q5  $F(1,6)=45.12$ ,  $p=.0005$ ,  $\eta_p^2=0.88$ ; Q6  $F(1,6)=58.71$ ,  $p=.0003$ ,  $\eta_p^2=0.91$ ;)。被験者は腕の長さが通常の時、腕が長い場合よりも姿勢の傾きを感じなかった(同期条件の主効果: Q7  $F(2,12)=5.07$ ,  $p=.0253$ ,  $\eta_p^2=0.46$ ; Q7:  $p=0.0253$ )。Q8 は被験者が質問を読んで答えているか確認するための統制質問であり、全て -3 に近い値となった。

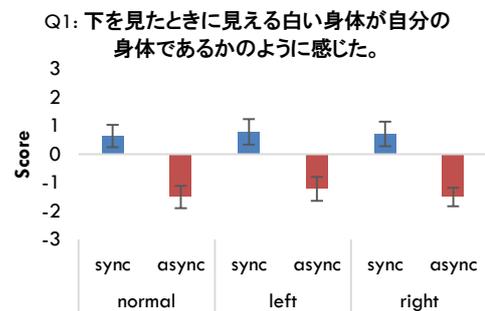


図2: 主観評定の結果(実験1: Q1)

### 3. 実験2

#### 3.1 方法

Kondo et al. (2018)[10]と同様な手袋と靴下のみの透明身体(図3)を用い、手袋の位置を移動させることで腕の長い透明身体に対して、身体所有感が生じるか調べた。

7名の被験者(すべて男性、平均年齢 22.14歳±1.574SD、平均身長 173.79cm±6.864SD、右利き 6名、左利き 1名)が実験に参加した。装置は、被験者が実際に手袋と靴下を装着したこと以外は実験1と同様であった。

被験者は実験1と同様のタスクを10分間行った(学習フェーズ)。10秒間の暗転後、部屋の中の映像と目の前に赤いボールが提示された。被験者はボールに対して手を伸ばし、手先がボールに届いたと感じる位置で手を止め、実験者がその位置を記録した(自己位置計測)。これは左右一回ずつランダム順で実施された。ボールは被験者の正面に頭部位置から 50, 52, 54, 56cm の距離にランダム順で提示された。

各試行の最後には主観評定を実施した。各被験者は身体条件 2 水準(通常、長い)と同期条件 2 水準(同期、非同期)の組み合わせを各 2 回ずつランダムな順で計 8 試行実施した。身体条件で長い水準の試行は左右一回ずつ実施した。実験の最初と最後には統制試行として、自己位置計測のみを行った。

1. 下を見たときに靴下の上にある透明な身体が自分の身体であるかのように感じた。
2. 鏡に映った手袋と靴下の間にある透明な身体が自分

の身体であるかのように感じた。

3. 自分の右腕が長くなったように感じた。
4. 自分の左腕が長くなったように感じた。
5. 鏡に映った手袋と靴下の間に全身が見える感じがした。
6. 白い手袋と靴下の動きが自分の動きのように感じた。
7. 白い手袋と靴下の動きが他人の動きのように感じた。
8. 普段と比べて姿勢が傾くような感じがした。
9. 自分の身体が床になったように感じた。

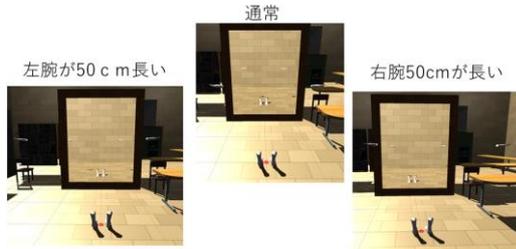


図 3：四肢先端のみの透明身体

## 3.2 結果

### 3.2.1 主観評定

各質問項目に対して、被験者内 2 要因(身体条件 2 水準、同期条件 2 水準)の分散分析を行った。透明身体が被験者の運動に同期して動くことで、腕の長さに関係なく身体所有感が生じた(図 4; 同期条件の主効果: Q1  $F(1,6)=22.00$ ,  $p=.0034$ ,  $\eta_p^2=0.79$ ; Q2  $F(1,6)=22.57$ ,  $p=.0032$ ,  $\eta_p^2=0.79$ )。被験者は透明身体の腕が長く同期しているとき、対応する腕が長くなったように感じた(交互作用: Q3&Q4  $F(1,12)=21.46$ ,  $p=.0036$ ,  $\eta_p^2=0.78$ )。被験者の動きに腕の長さが通常の透明身体の動きが同期しているとき、非同期の場合よりも手袋と靴下の間に全身が知覚された(交互作用: Q5  $F(1, 6)=3.93$ ,  $p=.0948$ ,  $\eta_p^2=0.40$ ;腕の長さ通常における同期条件の単純主効果:  $F(1,6)=8.00$ ,  $p=.03$ ,  $\eta_p^2=.57$ )。被験者の動きに透明身体の動きが同期している時、被験者はそれを自分の動きのように感じ、非同期の時は他人の動きのように感じた(同期条件の主効果: Q6  $F(1,6)=29.98$ ,  $p=.0016$ ,  $\eta_p^2=0.83$ ; Q7 ( $F(1,6)=18.63$ ,  $p=.005$ ,  $\eta_p^2=0.76$ ))。被験者はどの条件においても、姿勢の傾きを感じなかった(Q8)。Q9 は被験者が質問を読んで答えているか確認するための統制質問であり、全て-3に近い値となった。

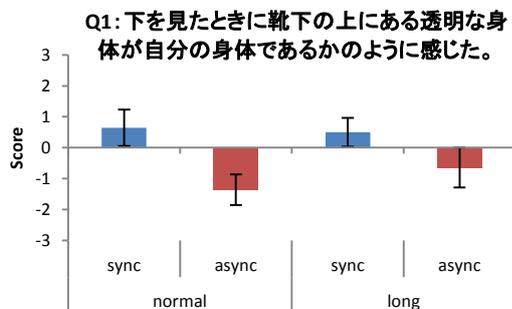


図 4：主観評定の結果(実験 2: Q1)

### 3.2.2 自己位置計測

伸ばした方向の手が学習時に長かった場合を腕が長い

条件、学習時に反対側の手が長かった場合を腕が短い条件として左右のデータを平均した。どちらも同じ長さの場合はそのまま左右で平均をとった。ボールの位置からの被験者の手の位置ずれを x 軸, y 軸, z 軸ごとに左右の手それぞれで求めた。また、各被験者の位置ずれから、統制試行のずれを引いた。

x 軸, y 軸, z 軸ごとに被験者内 2 要因(身体条件 3 水準、同期条件 2 水準)の分散分析を行った。

その結果、x 軸では腕の長さによる影響が見られ、腕が長いときに手の位置が左にずれた(身体条件の主効果:  $F(2,12)=7.0481$ ,  $p=.0095$ ,  $\eta_p^2=.54$ )。y 軸と z 軸では有意差が見られなかった。

## 4. 実験 3

### 4.1 方法

実験 3 ではボールを触る際の左右の手の使用頻度の変化を調べた。10 名の被験者(すべて男性、平均年齢 22 歳  $\pm 1.633SD$ , 平均身長  $170.66cm \pm 7.85SD$ , 右利き 9 名, 左利き 1 名)が実験に参加した。装置は実験 2 と同様であった。身体条件は実験 2 と同様であり、同期条件は同期のみであった。実験は学習パートとテストパートの 2 つを連続して行った。学習パートでは、実験 2 と同様のボールタスクを 10 分間行った。テストパートでは、5 秒間の休憩後、1 分間ボールをできるだけ早く触った。1 回のテストパートにボールは 15 個出現した。学習パート 1 回とテストパート 10 回を 1 セッションとし、身体条件 2 水準(通常, 長い)をランダムな順で 2 回繰り返した。身体条件で腕の長い水準は左右一回ずつ実施した。各セッションの最後に実験 2 と同様の主観評定を実施した。

### 4.2 結果

実験の途中で初期位置から大きく移動した 1 名、トラッキングが継続的に崩れていた 1 名を分析から除外した。

#### 4.2.1 主観評定

各質問項目に対して、ウィルコクソンの符号順位検定を行った。その結果、Q3&Q4(自分の右腕(左腕)が長くなったように感じた)のみ腕が長い方が通常よりも評定値が高くなった( $z(1,7)=-2.54$ ,  $p=.0078$ )。

#### 4.2.2 リーチングタスク解析

学習時とテストパートにおける、ボールを右手で触った割合を手の長さ条件それぞれに対して求めた。時系列変化を見るため、学習パートは時系列で 4 分割し、テストパートは試行ごとに 10 分割した。全試行を通して片方の手のみでボールを触っていた被験者 3 名は分析から除外した。

学習パートとテストパートにおける右手でボールを触った割合を時系列でプロットした(図 5)。学習時のボールを右手で触った割合に対して、被験者内 2 要因(身体条件 3 水準、時間条件 4 水準)の分散分析を行った。右手で触った割合が、右腕が長い時に、通常、左腕が長い時よりも多くなった(図 5: 身体条件の主効果:  $F(2,8)=15.18$ ,  $p=.002$ ,  $\eta_p^2=0.79$ ;)。

テスト時のボールの右手で触った割合に対して、被験者

内 2 要因（身体条件 3 水準，時間条件 10 水準）の分散分析を行った。その結果，右手でボールを触った割合が，右腕が長い時，通常，左腕が長いときよりも多くなった（身体条件の主効果： $F(2,8)=13.85$ ,  $p=.0025$ ,  $\eta_p^2=0.78$ ）。

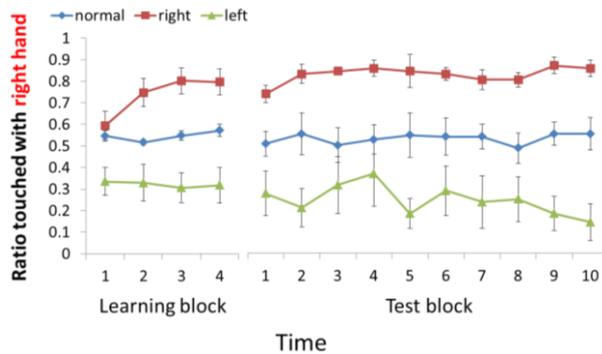


図 5：学習時とテスト時における右手でボールを触った割合の時系列変化

## 5. 考察

実験 1 では，被験者の運動にアバタの運動が同期することで，腕が長い身体と通常の身体の両方に所有感が生じた。被験者は，腕の長いアバタが身体運動に同期しているときにのみ腕を長く感じたため，腕の長いアバタに対する身体所有感によって被験者が感じる自身の腕の長さが変容したことが示唆された。

実験 2 では，被験者の身体運動に腕の長い透明身体が同期することで所有感が生じ，被験者自身の腕が長くなったように感じた。自己位置計測では，左右方向のみ身体条件で差が見られたため，手の長い映像が固有受容感覚に影響を与える可能性が示唆された。

実験 3 では，身体所有感計測の新たな行動指標として，ボールタスクを用いた左右の腕の使用頻度を用いた。被験者は腕の長い身体に対して所有感が生じ，長い腕をより多く使用した。しかし，長い腕の使用頻度が増加したことは，バーチャルな長い腕という道具使用に関する学習の可能性があり，所有感がなくてもこのような結果が得られることが考えられる。今後は，所有感が生じない条件においても実施できるタスクを検討し，新たな身体所有感計測指標としての確立を目指す。

## 6. 結論

被験者の身体運動に同期することで，腕の長い全身アバタと透明身体の両方に身体所有感が生じ，被験者自身の感じている腕の長さが変化した。腕の長い身体を獲得することで，より多く長い腕を使うようになった。

## 謝辞

本研究は，JST ERATO JPMJER1701，科学研究費補助

金基盤研究 A# 15H01701 および豊橋技術科学大学博士課程教育リーディングプログラム「超大規模脳情報を高度に技術するブレイン情報アーキテクトの育成」の補助を受けて実施された。

## 参考文献

- [1] Kilteni, K., Maselli, A., Kording, K. P., & Slater, M. (2015). Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 141.
- [2] Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756-756.
- [3] Gonzalez-Franco, M., Perez-Marcos, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2010, March). The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment. In *2010 IEEE virtual reality conference (VR)* (pp. 111-114). IEEE.
- [4] Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 270(1523), 1499-1506.
- [5] Kilteni, K., Normand, J. M., Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2012). Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion. *PLoS one*, 7(7), e40867.
- [6] Normand, J. M., Giannopoulos, E., Spanlang, B., & Slater, M. (2011). Multisensory stimulation can induce an illusion of larger belly size in immersive virtual reality. *PLoS one*, 6(1), e16128.
- [7] Banakou, D., Groten, R., & Slater, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12846-12851.
- [8] van der Hoort, B., Guterstam, A., & Ehrsson, H. H. (2011). Being Barbie: the size of one's own body determines the perceived size of the world. *PLoS one*, 6(5), e20195.
- [9] Guterstam, A., Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H. (2015). Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses. *Scientific reports*, 5, 9831.
- [10] Kondo, R., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Hoshi, T., Inami, M., & Kitazaki, M. (2018). Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity. *Scientific reports*, 8(1), 7541